



TITLE:

# 有機薄膜トランジスタの特性制御 およびそのチャネル上のナノスケ ール電荷分布評価に関する研究( Abstract\_要旨)

AUTHOR(S):

山岸, 裕史

---

CITATION:

山岸, 裕史. 有機薄膜トランジスタの特性制御およびそのチャネル上の  
ナノスケール電荷分布評価に関する研究. 京都大学, 2016, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2016-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k19714>

RIGHT:

許諾条件により本文は2017-03-23に公開

京都大学	博士（工学）	氏名	山岸 裕史
論文題目	有機薄膜トランジスタの特性制御およびそのチャネル上のナノスケール電荷分布評価に関する研究		
<p>（論文内容の要旨）</p> <p>有機エレクトロニクスにおいては、有機半導体を中心とする機能性材料を能動的な電子デバイスへ応用することを主眼においており、これまでの無機半導体を中心としたエレクトロニクスとは異なる価値を創出する学術研究として、その発展が期待されている。有機材料は、材料が軽量であること、フレキシブルなデバイスが実現可能であること、デバイス作製に溶液プロセスや低温プロセスが利用可能であること、合成可能であり多様性に富んでいること、など際立った特長を有しており、現在これらの特長を最大限引き出した高性能有機半導体デバイスを実現するための研究開発が精力的に進められている。有機薄膜トランジスタ（OTFT）は、上述した特長を生かしうる電子回路を構築する上での基幹デバイスの一つであり、その実用化に向けて広く研究開発が行われている。その一方で、OTFTの実用化および市場投入は未だ実現していない。</p> <p>本論文は、OTFTの特性制御法およびデバイスの局所物性評価法の開発を行い、デバイス実用化に向けた課題解決を目標に研究した結果をまとめたものであって、全6章からなっている。</p> <p>第1章は序論であり、本論文の研究背景及び有機エレクトロニクスにおける研究課題について述べている。まずOTFTの実用化に向けたデバイスのしきい値電圧制御技術の重要性について説明し、当該技術が現状では未確立であることを指摘している。さらに、OTFTのデバイス特性を最大限引き出すためのデバイスの微視的評価技術の重要性について説明している。</p> <p>第2章では、まずOTFTの動作原理および活性層に用いられる有機半導体材料について述べている。さらにその後OTFTの評価手法として用いる原子間力顕微鏡の動作原理や装置構成などについて説明している。</p> <p>第3章では、OTFTのしきい値電圧制御技術の開発内容について述べられている。まずOTFTの有機半導体/ゲート絶縁膜界面にポリマーバッファ層を導入し、そのバッファ層中にドーパントを導入することでしきい値電圧の制御が可能であることを示している。バッファ層内へのドーピングによって、デバイスの実効的な移動度とサブスレッショルドスイングが僅かに変化する可能性があることに言及した上で、ポリマーバッファ層中に導入するドーパント濃度を制御パラメータとしてOTFTのしきい値電圧のシフト量を連続的かつ細かく変化させることが可能であることを示し、本手法がOTFTのしきい値電圧制御において有効なアプローチであると結論付けている。</p> <p>第4章では、原子間力顕微鏡の派生技術であるケルビンプローブ原子間力顕微鏡（KFM）を用いて、可溶性低分子C<sub>8</sub>-BTBTの単結晶を活性層とするOTFTチャネルの表面電位評価を行った結果について述べている。まずC<sub>8</sub>-BTBT結晶では電気伝導に寄与する<math>\pi</math>電子系を有する分子シートが積層された構造をとっていることを説明し、その各分子層間が絶縁性のアルキル鎖によって電氣的に分離されているため層間抵抗が非常に高い状態であることを裏付ける結果を示している。さらにドレインおよびゲートにバイアスを印加した状態のC<sub>8</sub>-BTBT-OTFTのチャネル領域ではソース電極端に顕著な</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	山岸 裕史
<p>電位降下が見られることを示し、ソース・ドレイン電極間のキャリア輸送が有機/半導体界面に存在するエネルギー障壁によって律速されていることを明らかにしている。またデバイス動作後の OTFT のチャンネル領域における表面電位の測定結果から、C<sub>8</sub>-BTBT 結晶表面のステップ構造近傍では局所的にトラップ準位が高く、<math>2.6 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}</math> に達するトラップ電荷密度となっていることを明らかにしている。こうした結晶表面に局在するトラップ準位は、スタガ構造の OTFT など有機薄膜表面を横切るように電流が流れるデバイス構造において、その特性を制限する要因となり得ると述べている。</p> <p>第 5 章では、動作中の OTFT のチャンネル部におけるキャリアの空間分布の時間変化を可視化する手法の開発に取り組んだ内容について述べている。まず、OTFT に印加するバイアス電圧を掃引した時の表面電位変化を測定・解析するゲート電圧掃引法により、デバイス動作後にチャンネル上に存在する長寿命のトラップキャリアが可視化できることを示している。次に時間分解 KFM 法を用いることで、OTFT のチャンネル部に蓄積された正孔の拡散過程の可視化が可能であることを説明している。この時、正孔のチャンネルからの排出過程では高抵抗な DNTT 薄膜のグレイン境界が正孔の輸送を妨げており、その結果チャンネル上で空間的に不均一な電位分布が形成されていることを明らかにしている。また数値シミュレーションを併用してこの時のキャリア移動度の詳細な評価を行い、バイアスターンオフ後の DNTT 薄膜における移動度は、デバイスの電気特性から評価される移動度よりも非常に小さい値であるという結果が述べられている。この結果から、バイアスターンオフ直後の極めて短時間に生じる初期のキャリア排出過程で DNTT 薄膜の正孔密度が大きく減少し、その結果移動度が非常に小さくなった状態の正孔が、時間分解 KFM で可視化されていると結論付けている。ここでバイアスターンオフ直後の初期のキャリア排出過程をより定量的に評価するために、測定の時間分解能の向上が重要であると指摘している。この知見を踏まえ、より高い時間分解能でチャンネル上の電位変化に由来する静電気力を測定できる時間分解 EFM の開発を行った内容について述べている。瞬時周波数法を導入した時間分解 EFM では、3 <math>\mu\text{s}</math> の時間分解能で探針振動の瞬時周波数の時間変化が評価可能であることを実証している。さらに本手法を用いて DNTT-OTFT のチャンネル領域における電位分布の時間変化の評価を行い、DNTT 薄膜のグレイン境界に対応する領域の一部では、ゲートバイアス印加時にキャリア蓄積が不完全であることや、局所的にトラップ準位密度が高い可能性があることを明らかにしている。また瞬時周波数法を用いた時間分解 EFM 測定では、探針の瞬時周波数シフトがピークに到達するまでの時間を評価することで、キャリア拡散過程における正孔密度の時間変化の時定数が得られる可能性があることに言及している。</p> <p>第 6 章は結論であり、本論文で得られた成果について要約すると共に、今後の展望について述べている。</p>			

## (論文審査の結果の要旨)

本論文は、有機薄膜トランジスタの特性制御法及びデバイスの局所物性評価法の開発を行い、有機薄膜トランジスタの実用化に向けた課題解決を目標に研究した成果についてまとめたものである。本論文によって得られた主な成果は次のとおりである。

1. 有機薄膜トランジスタの有機半導体/ゲート絶縁膜界面に分子ドーピングされたポリマーバッファ層を導入する手法を開発し、本手法によりデバイスのしきい値電圧のシフト量を連続的に制御可能であることを示した。

2. 塗布成膜された  $C_8$ -BTBT 単結晶を活性層とする有機薄膜トランジスタに対してケルビンプローブ原子間力顕微鏡を用いてデバイス評価を実施し、デバイスの電気特性を制限し得る要因を明らかにした。結晶の特定の結晶軸に沿った方向へのキャリア移動がデバイス特性を制限し得ることや、結晶表面の分子ステップ近傍に局在するトラップ準位がデバイス特性に影響を与える可能性があることを示した。

3. 有機薄膜トランジスタのチャネル内におけるキャリアダイナミクスの評価手法として、ケルビンプローブ原子間力顕微鏡及び静電気力顕微鏡に基づく、新たなキャリア挙動の時間分解観察法を開発した。この開発した手法を用いて多結晶有機薄膜トランジスタの評価を行い、バイアスターンオフ時のチャネル内からの拡散過程にあるキャリアは、結晶粒界を反映した不均一な空間分布を形成していることを明らかにした。周波数変調原子間力顕微鏡では、探針に働く外力をカンチレバーの共振周波数のシフトとして捉えるが、瞬時周波数法を用いることで、外力の高速時間変化を測定することが可能となり、その結果、拡散過程のキャリアの空間分布の時間変化を  $3\ \mu\text{s}$  の時間分解能で可視化することに成功した。

本論文は、有機薄膜トランジスタの特性制御法及び評価手法の開発を通じて、デバイスの実用化に向けた課題の解決に取り組み、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 28 年 1 月 26 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。